

補助事業番号 2022M-225
補助事業名 2022年度 量子ビーム超高速時空間分布計測システムの開発 補助事業
補助事業者名 大阪大学産業科学研究所・助教・菅晃一

1 研究の概要

医・理・農・工に跨って社会応用されている量子ビーム（光子、荷電粒子、中性子）の性能評価・制御技術を高めることが本事業の最終目的であり、受益者（患者、研究者、一般市民）のニーズである。本事業では以下の二項目に分けて実施していく。ここで、計測手法としては電気光学（EO, Electro-Optic）サンプリングを用いる。

1. シンクロトロン放射光の時空間分布EO計測
2. 高強度テラヘルツ波・テラヘルツ自由電子レーザーの時空間分布計測

2 研究の目的と背景

量子ビーム（光子、荷電粒子、中性子）の社会応用は、医学における粒子線治療に始まり、薬学（化合物の構造解析）、産学（半導体加工）、農業（品種改良）でも近年では利用されている。近年、量子ビームのパルス幅（進行方向のサイズ）が物質との相互作用が注目されている。したがって、量子ビームを高い精度で性能評価・制御することが、喫緊の課題である。

シンクロトロン放射光は、荷電粒子が磁場によって軌道を曲げられた時に発生する指向性を持った強力な電磁波のことである。これは等速直線運動を行う荷電粒子から生成されるクーロン電場と異なり、加速度（磁場）が生じることによって形成される。我々は既に、世界に先駆けて、EOサンプリングを用いたシングルショットでクーロン電場の時空間分布計測に成功している。本手法をこの放射光に応用し、その特性を明らかにすることを目的とする。

一方、高強度テラヘルツ波・テラヘルツ自由電子レーザーの光源は、新分野の開拓（複雑な材料解析や微細な半導体加工等）が期待されている。このような高強度パルス放射光に対しても、EOサンプリングを実施し、同時に、シングルショット計測の改良を通して、光特性の解明を目的とする。

3 研究内容

- (1) 量子ビーム超高速時空間分布計測システムの開発、研究題目と財団バナーの告知 (<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/KKan.html>)

(2) 本事業で行ったシングルショット電子ビーム計測

シングルショット電子ビーム計測の概略図を示す(図1)。エシェロンミラーや回折格子を利用して、時間と空間方向に分割されたプローブ光(フェムト秒レーザー)のパルスを用いて、電子ビームの周りの電場をシングルショットで計測する。電気光学(EO)結晶における外部電場由来の偏光変化(ポッケルス効果)について、レンズや偏光光学素子と組み合わせ、時空間の電場分布として、カメラを用いて二次元検出を行った。

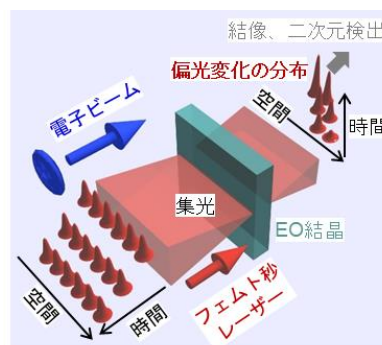


図1 シングルショット電子ビーム計測の概略図。

(3) エシェロン式シングルショット計測の改良

図2に、時間窓の校正の例を示す。フェムト秒レーザーからのパルス光をビームスプリッターにより分岐する(図2(a))。分岐された片方の光は光学遅延を調整可能な平面鏡の移動鏡(Moving mirror)、もう片方の光はエシェロンミラーもしくは回折格子によって反射される。再度、ビームスプリッターで2つの光を合流させて、電子ビーム測定のための4-f結像光学系、CCDカメラにおける視野を調整するための縮小光学系を通して、撮像を行った。エシェロンミラーにおける時間窓は段の高さ(光学遅延量)と幅によって見積もることができる。この場合は、ある光のサイズでの光学遅延の総量(高さによる光学遅延とまたぐ幅の数の積に比例)から時間窓を予想することができた。一方、回折格子を用いる場合は、回折光を下流へ輸送できる入射角とした。例えば、入射光と戻り光が一致する条件は、回折格子の方程式により入射・反射・回折角を見積もることができる。そのため、0度入射ではない理由から、幾何光学的に回折位置による光学遅延を見積もることができる。

図2(b)および図2(c)に、エシェロンミラーを用いた場合で、移動鏡の相対的な光学遅延が、それぞれ、0 psおよび6.7 psのCCDカメラの測定結果を示す。今後の予定ではCCDカメラ前で2光路の位相オフセット法を予定して

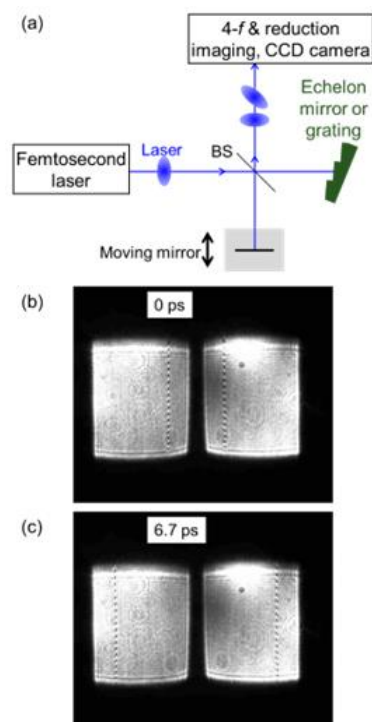


図2 時間窓の校正における(a)光学系、(b)時間遅延 0 psにおけるカメラの画像、(c)時間遅延 6.7 psにおけるカメラの画像。

いたので、2つの光のパターンが観測できる。また、光学遅延の調整により、垂直方向にできた干渉縞は水平方向へ移動することが分かった。干渉縞の移動は、進行方向に対して傾いた光と傾いていない光の一部が干渉していることに起因していると考えられる。また、光学遅延により移動量（CCDカメラ上のピクセル数、長さ）の係数が得られるため、後の実験の校正値として使用した。

図3に、加速器からの電子ビーム計測の例を示す。フェムト秒レーザーからの光は、ビームスプリッターを用いて、エシェロンもしくは回折格子によって時空間分布が調整されたレーザーを下流へ輸送した（図3(a)）。加速器からのサブピコ秒電子ビームは、4-f 結像光学系の中間に設置された電気光学（EO）結晶（ZnTe(110)面）近辺を通過した。電子ビーム周りのテラヘルツ電場によるポッケルス効果で変化するフェムト秒レーザーの偏光変化を、下流のCCDカメラや偏光光学素子を用いて観測した。図3(b)および図3(c)に、測定結果の例を示す。光のパターンの均一性に問題があったため、左側のパターン（点線内）で異なる電子ビームショットに対して、位相オフセット法を行った。CCDカメラ上では、水平方向を時間軸、垂直方向を空間軸として読み替えることが可能である。図3(b)および図3(c)において、(偏光光学素子としての)1/4波長板の位相は左側のパターンにおいて、それぞれ、 $+3^\circ$ および -3° とした。右側のパターンは電子ビーム確認のための直交ニコルの条件とした。位相を変化させることにより、左側では明暗が反転し、電子ビームの反対側の空間（縦方向の軸）では電場の向きが逆転することが分かる。

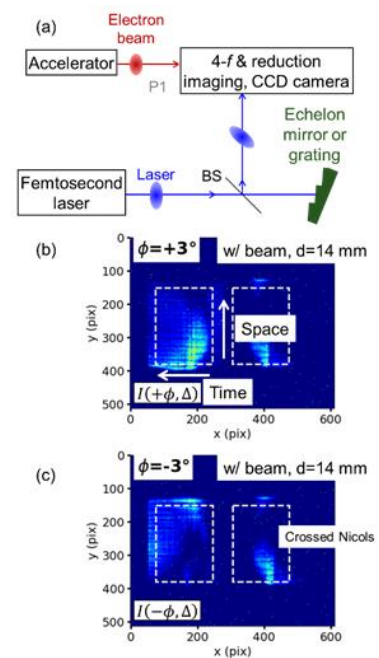


図3 電子ビーム計測の(a)光学系、1/4 波長板の位相は左側のパターンにおいて、それぞれ、(b) $+3^\circ$ および(c) -3° とした場合の測定データ。

(4) 高強度テラヘルツ波・テラヘルツ自由電子レーザーの時空間分布計測

レンズによるラジアル偏光テラヘルツ波の集光を通して、高強度テラヘルツ波のシングルショット計測を行っている。レンズではテラヘルツ波を集光できるため、従来は観測が困難であった、軸方向電場の計測が容易になった（図4）。軸方向電場は光加工や光トラッピングなどの応用が行われている。本研究の、軸方向電場の計測においては、

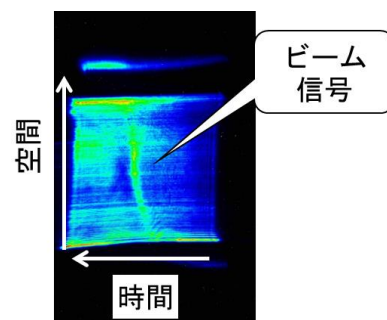


図4 高強度テラヘルツ波の計測。

ZnTe(100)面の厚2 mmのE0結晶を用いた。(110)面と同じ口径の結晶が準備できなかったため、縦方向・空間方向が結晶サイズで制限されている状態である。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究の成果は、シングルショットの超高速計測学に分類されるため、電子ビームに限らず、光由来の超高速現象の計測に関しても適用が可能である。電子ビーム由来の現象に関しては、シンクロトロン放射や高強度テラヘルツ波を含む電磁場の放射現象（チェレンコフ放射、スミス・パーセル放射）の計測へ応用が可能である。また、電場計測に基づいているため、光源加速器のビーム診断による物質科学への貢献、重粒子線による放射線治療のビーム診断、リソグラフィ等の電子ビーム加工装置における試料の帯電計測等への展開も期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでに、本事業者は、超短パルス電子ビーム発生、電子ビームの医療応用、電子ビームからのテラヘルツ波発生・測定、電子ビーム誘起現象の時間分解テラヘルツ分光、大口径光伝導アンテナを用いたテラヘルツ波発生と検出、電気光学（E0）サンプリングを用いた電子ビーム計測等の研究を行ってきた。本補助事業では、E0結晶を用いた電子ビーム計測の発展と応用に着手し、シンクロトロン放射光および高強度テラヘルツ波・テラヘルツ自由電子レーザーの特性理解のための、シングルショット計測システムの構築と改良・数値計算による電場分布の解析に関する研究を行うこととなった。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

該当なし

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

該当なし

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

「第19回日本加速器学会年会」ポスター発表 Proceedings オンライン発行

https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/WEPO/WEPO21.pdf

Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan
October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University) 電気光学サンプリングを用いたシングルショット電子ビーム計測, p.565-568, PASJ2022 WEPO21

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 大阪大学産業科学研究所

住 所： 〒567-0047

大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1

担 当 者： (元) 助教 菅晃一 (カン コウイチ)

担 当 部 署： 産業科学研究所 (サンギョウカガクケンキュウシヨ)

E - m a i l : koichi81@sanken.osaka-u.ac.jp

U R L : 旧所属、研究室HP (ナノ極限ファブリケーション分野)

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bsn/index.html>

旧所属、部署HP (大阪大学産業科学研究所) のトップページ

<https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/>